

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ БУРОВОГО ІНДЕКСУ АНІЗОТРОПІЇ ГІРСЬКОЇ ПОРОДИ

Я. М. Кочкодан\*, А. І. Васько, І. А. Васько

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 727137,  
e-mail: drill@nuing.edu.ua

У процесі буріння стовбури свердловин самовільно викривляються від заданого напрямку. Буріння викривленої свердловини спричиняє певні технологічні труднощі, тому розроблення заходів для запобігання викривленню стовбура є дуже важливим фактором підвищення ефективності бурових робіт. На ступінь та інтенсивність викривлення свердловин впливає складний комплекс чинників, характер впливу кожного з яких встановити важко. Щоб запобігти викривленню свердловин, необхідно впроваджувати різноманітні техніко-технологічні заходи. На даний час вважають, що на довільне викривлення свердловин впливають геологічні, технічні та технологічні чинники. Сучасні стандарти спорудження глибоких свердловин та ведення похило-скерованого і горизонтального буріння вимагають вдосконалення конструкцій бурильного інструменту і технологій виконання бурових робіт. Бурильна колона експлуатується в агресивних та абразивних середовищах під дією інтенсивних динамічних та тривалих циклічних навантажень. У цьому напрямку актуальними залишаються питання застосування віброзахисних компоновок трубних колон, прогнозування властивостей гірських порід і уточнене моделювання контактної взаємодії бурильного інструменту зі стінкою свердловини, покращення експлуатаційних властивостей бурильного інструменту шляхом локального застосування спеціалізованих функціонально градієнтних покриттів та забезпечення надійності і герметичності різьбових з'єднань. Слід зазначити, що розвиток моделей контактної взаємодії між трубними колонами і шаруватим чи гетерогенним середовищем гірської породи дозволить точніше вирішувати типові проблеми буріння: забезпечення потрібного крутного моменту на долоті; визначення реального осевого навантаження на вибій; оцінювання енергетичного балансу процесу буріння та ресурсу бурильної колони, прогнозування траєкторії стовбура свердловини. До основних геологічних причин, які спричиняють довільне викривлення свердловин, належать анізотропність, тріщинуватість гірських порід, а також чергування порід різної твердості та кути нахилу пластів.

Ключові слова: анізотропія, бурильна колона, буровий індекс анізотропії, гірська порода, зенітний кут, кут нахилу пласта, навантаження на долото, режимно-технологічні параметри.

При буренні стволы скважин самопроизвольно искривляются от заданного направления. Бурение искривлённой скважины влечет за собой определенные технологические трудности, поэтому разработка мер по предотвращению искривления ствола является очень важным фактором повышения эффективности буровых работ. На степень и интенсивность искривления скважин влияет сложный комплекс факторов, характер влияния каждого из которых трудно установить. Для предотвращения искривления скважин необходимо внедрять различные технико-технологические мероприятия. В настоящее время считают, что на произвольное искривление скважин оказывают влияние геологические, технические и технологические факторы. Современные стандарты строительства глубоких скважин и ведения наклонно-направленного и горизонтального бурения требуют усовершенствования конструкций бурильного инструмента и технологий выполнения буровых работ. Бурильная колонна эксплуатируется в агрессивной и абразивной среде под воздействием интенсивных динамических и длительных циклических нагрузок. В этом направлении актуальными остаются вопросы применения виброзащитных компоновок трубных колонн, прогнозирование свойств горных пород и уточнённое моделирование контактного взаимодействия бурильного инструмента со стенкой скважины, улучшение эксплуатационных свойств бурильного инструмента путем локального применения специализированных функциональных градиентных показателей и обеспечение надежности и герметичности резьбовых соединений. Следует отметить, что развитие моделей контактного взаимодействия между трубными колоннами и слоистой или гетерогенной средой горной породы позволит более точно решать типичные проблемы бурения: обеспечение нужного крутящего момента на долоте; определение реальной осевой нагрузки на забой; оценка энергетического баланса процесса бурения и ресурса бурильной колонны; прогнозирование траектории ствола скважины.

Ключевые слова: анизотропия, бурильная колонна, буровой индекс анизотропии, горная порода, зенитный угол, угол наклона пласта, нагрузка на долото, режимно-технологические параметры.

*At the time of well drilling, wellbores arbitrarily deviate from a given direction. Directional well drilling imposes specific technological difficulties. That's why the development of measures to prevent the dog leg is a significant factor in the effective increase of the drilling works. The degree and intensity of well deviation are influenced by several complex factors characterized by hard-to-establish impact nature. To prevent the dog leg, it is necessary to implement various technical and technological measures. Their development requires studying the causes of well deviation. It is currently believed that the arbitrary well deviation is influenced by geological, technical, and technological factors. Modern standards of deep well construction and inclined and horizontal drilling require improving drilling tool designs and technologies. The drill string is operated in aggressive and abrasive environments under the influence of intensive dynamic and long cyclic loadings. Therefore, the problems of using vibration protection arrangements of pipe columns, predicting the properties of rocks, and advanced modeling of the contact interaction of the drilling tool with the well wall, improving the performance of the drilling tool through the local application of specialized functionally gradient coatings and ensuring the reliability and tightness of threaded connections are still relevant nowadays. It should be mentioned that models' development of contact interaction between pipe columns and layered or heterogeneous rock environment will allow solving typical drilling problems more precisely: providing the required torque on the bit; determination of the actual axial load on the bottom hole; assessment of drilling process energy balance and drill string resource, forecasting wellbore trajectory.*

Keywords: anisotropy, drill string, anisotropy drilling index, rock, inclination angle, bedding angle, pressure on the bit, account technological parameters of drilling mode.

### **Вступ**

Основною геологічною причиною, яка зумовлює зміну траєкторії осі свердловини, є анізотропія гірських порід, зумовлена їх мінералогічним складом. Оскільки швидкість руйнування гірських порід у різних напрямках, як на вибої, так і у боковій при вибійній частині стінки ствола свердловини, є різною. За своїм походженням більшість гірських порід мають шарувату структуру. У шаруватих породах площини напластування є шарами послаблення, вздовж яких механічні властивості менші, ніж в інших напрямках, але у самих площинах напластування міцнісні та деформаційні властивості однакові. Для таких порід характерний трансверсально-ізотропний тип анізотропії, при якому властивості породи у площинах напластування (площинах ізотропії) однакові і відрізняються від властивостей перпендикулярно шарам (ортогональному напрямку – вздовж осі ізотропії). Через те, що у гірській породі є горизонтальні поверхні послаблення, спричинені горизонтальним напластуванням, цими поверхнями руйнується порода.

### **Мета роботи**

З'ясувати неточності при розробленні методики визначення бурового індексу анізотропії, яка враховує буримість гірських порід, режимно-технологічні чинники та кути нахилу пластів. Розроблення аналітичної залежності для визначення бурового індексу анізотропії з врахуванням режимно-технологічних параметрів, зенітного кута та кута нахилу пластів.

### **Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій**

Для визначення показника або ступеня анізотропії використовують різні методики. Найпоширенішою є методика, за якою ступінь анізотропії визначають за відношенням мінімальної швидкості руйнування до максимальної [11]. Для цього визначають механічні властивості гірських порід вздовж і перпендикулярно шаруватості. Інша методика визначення показника анізотропії ґрунтується на замірі швидкостей поширення хвиль у кубічних взірцях у взаємоперпендикулярних напрямках. Інші автори для оцінки анізотропії використовують коефіцієнт анізотропії – величину обернену до ступеня [5]. Для оцінки впливу анізотропії гірських порід на зміну траєкторії при бурінні свердловин використовують буровий індекс анізотропії « $h_a$ » (відносна різниця між швидкістю руйнування у перпендикулярному і паралельному напрямках до площини шаруватості)

$$h_a = 1 - \frac{V_{\parallel}}{V_{\perp}}, \quad (1)$$

де  $V_{\parallel}$  – швидкість руйнування породи у паралельному шаруватості напрямку;

$V_{\perp}$  – швидкість руйнування породи у перпендикулярному шаруватості напрямку.

Ступінь впливу геологічних факторів на довільне викривлення визначили американські дослідники Г. Вудс та А. Лубінський, які запропонували ввести поняття бурового індексу анізотропії [1]. Також вплив анізотропії гірських порід на довільне викривлення свердловин досліджено у працях [2-8].

### Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Вчені [2-8] проводили дослідження з невеликими зенітними кутами свердловин, малими зазорами між стінкою свердловини і колоною труб та мінімальним внутрішнім діаметром колони труб, що значно ускладнювало процес промивання свердловин. При визначенні величини бурового індексу анізотропії вищезгадані дослідники не врахували кути нахилу пластів, осьове навантаження на долото та зазори між стінкою свердловини та колоною труб.

Визначити буровий індекс анізотропії у промислових умовах дуже складно, оскільки необхідно опрацювати значний об'єм геологічного матеріалу.

### Формулювання цілей статті

Ціллю даної роботи є розроблення методики визначення бурового індексу анізотропії, яка включає в себе, окрім буримості, режимно-технологічні фактори та кути нахилу пластів.

### Висвітлення основного матеріалу дослідження

Під час буріння свердловин в анізотропних породах напрямок буріння не збігається з напрямком сили, що діє на долото, на відміну від ізотропних порід, де вони збігаються.

Для з'ясування впливу анізотропії гірських порід на ступінь та інтенсивність викривлення свердловини нами проведено аналітичні дослідження для умов буріння гірських порід у пласті, який розташований під деяким кутом [9, 10].

Нехай вісь нижньої частини бурильної колони займе положення, відображене на рисунку 1а. Як бачимо,

$$\frac{H}{G_D} = \operatorname{tg}(\varphi - \alpha), \quad (2)$$

де  $H$  – нормальна складова реакції вибою на долото, Н;

$G_D$  – осьове навантаження на долото, Н;

$\varphi$  – кут між вертикаллю і вектором навантаження на вибій, град;

$\alpha$  – зенітний кут свердловини, град.

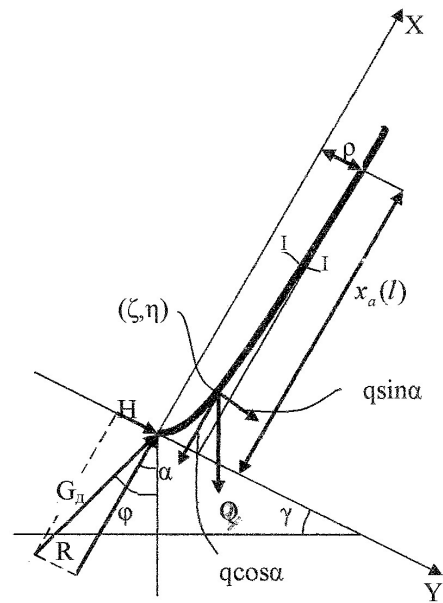
Перевівши розмірні компоненти сил  $H$  та  $G_D$ , що діють на долото у безрозмірні, отримаємо:

$$H = h \cdot m \cdot q \cdot \cos \alpha, \quad (3)$$

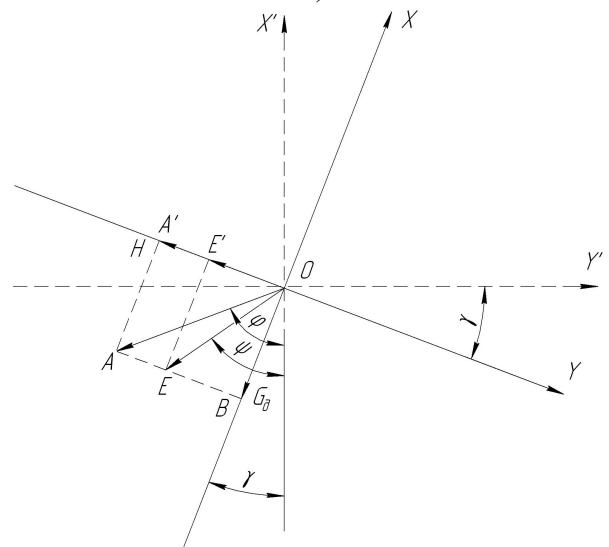
$$G_D = x_2 \cdot m \cdot q \cdot \cos \alpha, \quad (4)$$

де  $h$  – нормальна складова реакції вибою на долото в безрозмірних одиницях;

$m$  – коефіцієнт для переведення величин із розмірних у безрозмірні;



а)



б)

а – стовбур свердловини;

б – поворот осей координат

Рисунок 1 – Схема для визначення бурового індексу анізотропії гірської породи

$q$  – вага одиниці довжини труби нижньої частини бурильної колони від точки дотику зі стінкою свердловини до долота, Н/м;

$x_2$  – осьове навантаження на долото у безрозмірних одиницях.

Підставивши (3) і (4) в (2), отримаємо:

$$\frac{h}{x_2} \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg}(\varphi - \alpha). \quad (5)$$

Рівняння (5) характеризує тенденцію свердловини до зміни напрямку буріння.

Наведені аналітичні залежності характеризують умови буріння в ізотропних породах, коли напрям буріння збігається з напрямком сили, що діє на долото.

Під час буріння в анізотропних породах напрям буріння не збігається із напрямком сили, що діє на долото. Для встановлення впливу анізотропії порід на викривлення свердловин розглянемо умови буріння в пласті, що розташований під кутом « $\gamma$ » і має буровий індекс анізотропії « $h_a$ ». Виберемо таку систему координат, вісь « $x$ » якої перпендикулярна до площини падіння пластів, а вісь « $y$ » – паралельна (рис.16).

Компоненти миттєвого переміщення в напрямку осей будуть пропорційні величині сили.

Для ізотропних порід:

у напрямку осі « $x$ » –  $K \cdot G_0$

у напрямку осі « $y$ » –  $K \cdot H$ ,

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності, який залежить від властивостей порід.

Для анізотропних порід переміщення у напрямку осі « $y$ » буде меншим, ніж для ізотропних порід на величину  $(1-h_a)$ , тобто  $K(1-h_a) \cdot H$ .

З рис. 16 виходить, що:

$$\frac{H}{G_0} = \operatorname{tg}(\varphi - \gamma), \quad (6)$$

$$\frac{H(1-h_a)}{G_0} = \operatorname{tg}(\Psi - \gamma) \text{ або } \frac{H}{G_0} = \frac{\operatorname{tg}(\Psi - \gamma)}{1-h_a}, \quad (7)$$

де  $\Psi$  – поточний зенітний кут на виході із пласта, град;

$\gamma$  – кут нахилу пласта, град.

Прирівнявши (6) і (7), отримаємо:

$$\operatorname{tg}(\varphi - \gamma) = \frac{\operatorname{tg}(\Psi - \gamma)}{1-h_a}. \quad (8)$$

Для умови стабілізації зенітного кута під час буріння в похилозалеглих анізотропних породах  $\Psi = \alpha$ .

Підставивши в рівняння (8)  $\Psi = \alpha$  з врахуванням рівняння (5) і провівши відповідні перетворення, визначимо буровий індекс анізотропії.

$$h_a = \frac{\frac{h}{x_2} \operatorname{tg} \alpha}{\cos^2(\gamma - \alpha) \left[ \frac{h}{x_2} \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg}(\gamma - \alpha) \right]}. \quad (9)$$

Щоб визначити складові реакції вибою на долото  $h$  та  $x_2$ , скористаємось рівнянням моментів, які діють на нижню ділянку бурильної колони (рис. 1а). Складемо для окремої ділянки пружної осі бурильної колони інтегродиференціальне рівняння

$$EI \frac{d^3 y}{dx^3} = -G_0 y + Hx + \quad (10)$$

$$+ \int_0^x [q \cos \alpha (y - \eta) + q \sin \alpha (x - \xi)] d\xi,$$

де  $EI \frac{d^3 y}{dx^3}$  – момент внутрішніх сил;

$q \cos \alpha$  – компонента рівномірно розподіленого навантаження, напрямлена вздовж осі  $x$ ;

$q \sin \alpha$  – компонента рівномірно розподіленого навантаження, напрямлена вздовж осі  $y$ ;

$\xi, \eta$  – біжучі координати між початком та кінцем ділянки інтегрування ( $\xi$  змінюється від 0 до  $x$ , а  $\eta$  – від 0 до  $y$ ).

Інтегруючи та диференціюючи рівняння (10) та використовуючи нові змінні між розмірними та безрозмірними величинами з врахуванням

$$\frac{EI}{m^3 q \cos \alpha} = 1, \quad (11)$$

отримаємо:

$$\frac{d^3 U}{dx^3} = -(x_2 - X) \frac{dU}{dx} + X + h, \quad (12)$$

де

$$\frac{x}{m} = X, \quad (13)$$

$$dx = m dX, \quad (14)$$

$$y = m U \operatorname{tg} \alpha, \quad (15)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dU}{dx} \operatorname{tg} \alpha, \quad (16)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{m} \cdot \frac{d^2 U}{dx^2}, \quad (17)$$

$$\frac{d^3 y}{dx^3} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{m^3} \cdot \frac{d^3 U}{dx^3}, \quad (18)$$

$$\frac{G_0}{mq \cos \alpha} = x_2, \quad (19)$$

$$\frac{H}{mq \sin \alpha} = h. \quad (20)$$

Рівняння (12) розв'яжемо методом апроксимації, використовуючи як апроксимуючу функцію

$$U_a = \rho \sin \frac{\pi x}{2x_a}. \quad (21)$$

Після розв'язку отримаємо:

$$h = \rho \left( \frac{x_2}{x_a} - 1 + \frac{2}{\pi} \right) - \frac{x_a}{2}, \quad (22)$$

де  $\rho$  – зазор між нижньою частиною бурильної колони та стінкою свердловини у безрозмірних одиницях;

**Таблиця 1 – Величини бурового індексу анізотропії гірської породи, розраховані за промисловими даними (чисельник) та визначені за результатами експериментальних даних (знаменник)**

Відклади	Площа (родовище)		
	Північна Долина	Луква	Пасічна
Вигодська	$\frac{0,035 \pm 0,001}{0,028 \pm 0,002}$	$\frac{0,038 \pm 0,001}{0,025 \pm 0,002}$	-
Менілітова	$\frac{0,026 \pm 0,001}{0,032 \pm 0,002}$		$\frac{0,029 \pm 0,001}{0,035 \pm 0,002}$
Манявська	$\frac{0,013 \pm 0,005}{0,015 \pm 0,002}$	$\frac{0,058 \pm 0,013}{0,015 \pm 0,003}$	$\frac{0,048 \pm 0,013}{0,017 \pm 0,003}$
Полянницька	$\frac{0,025 \pm 0,001}{0,018 \pm 0,002}$	$\frac{0,018 \pm 0,005}{0,014 \pm 0,002}$	$\frac{0,020 \pm 0,005}{0,016 \pm 0,002}$
Ямненська	-	-	$\frac{0,04 \pm 0,0015}{0,033 \pm 0,002}$

$x_a$  – відстань від долота до точки дотику бурильної колони зі стінкою свердловини у безрозмірних одиницях.

$$\rho = \frac{r}{mtg\alpha}, \quad (23)$$

де  $r$  – зазор між нижньою частиною бурильної колони та стінкою свердловини, м.

$$r = \frac{D_c - d_3}{2}, \quad (24)$$

де  $D_c$  і  $d_3$  – відповідно діаметр свердловини та зовнішній діаметр бурильних труб, м.

$$m = \sqrt[3]{\frac{EI}{q \cos \alpha}}, \quad (25)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу труб, Н/м<sup>2</sup>;  
 $I$  – осьовий момент інерції, м<sup>4</sup>.

$$I = \frac{\pi}{64} (d_3^4 - d_6^4), \quad (26)$$

де  $d_6$  – внутрішній діаметр бурильних труб, м.

Вага одиниці довжини труб у промивальній рідині рівна:

$$q = \frac{\pi}{4} \cdot (d_3^2 - d_6^2) \cdot (\rho_m - \rho_{np}) g, \quad (27)$$

де  $\rho_m$  і  $\rho_{np}$  – відповідно густина матеріалу труб та промивальної рідини, кг/м<sup>3</sup>.

$$x_a = 8 \frac{\rho}{x_a} \left( \frac{3}{x_a^2} - Ax_2 + Bx_a \right), \quad (28)$$

$$A = \frac{12}{\pi^2} - 1, \quad (29)$$

$$B = \frac{36}{\pi^2} \cdot \left( 1 - \frac{2}{\pi} - \frac{\pi}{36} - \frac{\pi^2}{36} \right). \quad (30)$$

Рівняння (28) є трансцендентним, тож його розв'язують методом ітерації.

Таким чином, якщо відомі зенітний кут « $\alpha$ », кут нахилу пласта « $\gamma$ », режимно-технологічні параметри « $h$ » та « $x_2$ », то за формулою (9) можна визначити буровий індекс анізотропії, а також оцінити його вплив на викривлення свердловин.

Для аналізу були вибрані свердловини із однаковими геологічними розрізами та приблизно однаковими фізико-механічними властивостями гірських порід, буріння яких велось однотипними КНБК при ідентичних режимно-технологічних параметрах. Використовуючи наведені вище формули, аналогічно розраховували буровий індекс анізотропії (табл. 1).

Для підтвердження отриманих аналітичних розрахунків бурового індексу анізотропії нами проведено лабораторні дослідження міцнісних характеристик натурних взірців гірської породи (керна), відібраних із однакових відкладів при бурінні різних свердловин. З відібраних кернів виготовляли зразки гірської породи циліндричної форми, у яких площини нашарування були розташовані перпендикулярно і паралельно висоті.

Згідно з існуючою методикою [15] у взірць гірської породи за допомогою преса втискували циліндричний індензор до руйнування породи з одночасною фіксацією тиску за допомогою манометра та деформації.

За результатами експериментальних даних побудовані графічні залежності зміни деформації від навантаження, на основі яких визначили твердість гірської породи та коефіцієнт пластичності. Знаючи твердість та пластичність гірської породи, розраховували умовні показники буримості за формулою:

$$\delta = \frac{10^{10}}{A \cdot p_{ш} \cdot \sqrt{K_{пл}}}, \quad (32)$$

де  $\delta$  – буримість гірської породи;  
 $A$  – абразивність гірської породи, мг;  
 $p_{ш}$  – твердість гірської породи, Н/м<sup>2</sup>;  
 $K_{пл}$  – коефіцієнт пластичності гірської породи.

Варто зауважити, що абразивність та коефіцієнт пластичності гірської породи, визначені при випробуванні перпендикулярно та паралельно нашаруванню, мають однакові значення, тому буровий індекс анізотропії можна визначити за тиском, за якого руйнується зразок гірської породи перпендикулярно та паралельно нашаруванню.

$$h_a = 1 - \frac{P_{ш\perp}}{P_{ш\parallel}}, \quad (33)$$

де  $P_{ш\perp}, P_{ш\parallel}$  – відповідно тиск, при якому руйнується гірська порода перпендикулярно та паралельно нашаруванню.

Результати розрахунків бурового індексу анізотропії на основі експериментальних досліджень міцнісних характеристик зразків гірської породи наведені в таблиці 1.

Аналізуючи результати проведених лабораторних досліджень, бачимо, що значення бурового індексу анізотропії, визначені експериментальним шляхом, практично збігаються із розрахованими аналітично (із допустимою для практичних розрахунків похибкою).

Під час буріння свердловини у похило залеглих пластах азимут викривлення переважно збігається із азимутом нахилу пласта. Якщо пласти залягають незгідно, то при переході із одного пласта в інший азимутальний кут змінюється. У цьому випадку внаслідок впливу анізотропії гірських порід та зміни кутових параметрів пласта вісь свердловини намагається займати напрям, перпендикулярний до площини нахилу пласта.

Визначимо вплив режимно-технологічних факторів та кутових параметрів пласта на зміну напрямку буріння. Виберемо основну систему координат, у якій осі «x» та «y» розташовані у горизонтальній площині, а вісь «z» направлена догори (рис. 2), причому азимут розбурюваного пласта « $\Theta_1$ ».

Повернувши основну координатну систему хуз стосовно осі «z» на кут  $\Theta_1$  введемо додаткову систему координат  $x_{\Theta_1} y_{\Theta_1} z_{\Theta_1}$ .

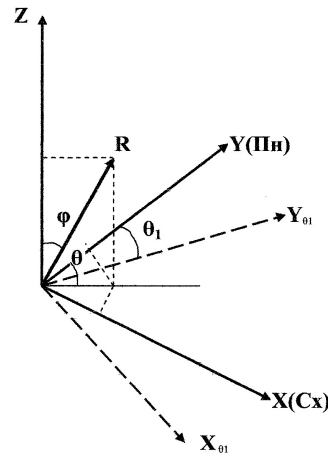


Рисунок 2 – Схема для розрахунку просторового орієнтування свердловини

Повернувши додаткову систему координат  $x_{\Theta_1} y_{\Theta_1} z_{\Theta_1}$  відносно осі  $x_{\Theta_1}$  на кут залягання пласта « $\gamma$ », отримаємо ще одну додаткову систему координат  $x_{\Theta_1\gamma} y_{\Theta_1\gamma} z_{\Theta_1\gamma}$ . Проектуючи силу  $R$  на осі  $z_{\Theta_1\gamma}, y_{\Theta_1\gamma}, x_{\Theta_1\gamma}$ , отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \Delta z_{\Theta_1\gamma} &= R \cos \varphi \cos \gamma + R \sin \varphi \cos(\Theta - \Theta_1) \sin \gamma \\ \Delta y_{\Theta_1\gamma} &= R \sin \varphi \cos(\Theta - \Theta_1) \cos \gamma - R \cos \varphi \sin \gamma \\ \Delta x_{\Theta_1\gamma} &= R \sin \varphi \sin(\Theta - \Theta_1) \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

У процесі буріння похило залеглих анізотропних гірських порід напрям буріння збігається з напрямком рівнодійної швидкостей, а не сил. Для того, щоб врахувати вплив анізотропії ( $h_a$ ), перейдемо від сил до швидкостей, вважаючи, що у площині нахилу пласта ( $x_{\Theta_1\gamma} y_{\Theta_1\gamma}$ ) швидкість буріння (відповідно і компоненти миттєвих переміщень на осі  $x_{\Theta_1\gamma} y_{\Theta_1\gamma}$ ) менша на величину  $(1 - h_a)$ , ніж величина сили, а у напрямі вертикальної осі ( $z_{\Theta_1\gamma}$ ) – пропорційна.

Повертаючи додаткову систему координат  $x_{\Theta_1\gamma} y_{\Theta_1\gamma} z_{\Theta_1\gamma}$  у зворотному напрямку відносно осі  $x_{\Theta_1}$  на кут « $\gamma$ » і стосовно осі  $z$  на кут  $\Theta_1$  та спроектувавши швидкості на осі  $x, y, z$ , отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_z &= k \Delta z_{\Theta_1\gamma} \cos \gamma - k \Delta y_{\Theta_1\gamma} (1 - h_a) \sin \gamma \\ \Delta V_y &= [k \Delta y_{\Theta_1\gamma} (1 - h_a) \cos \gamma + k \Delta z_{\Theta_1\gamma} \sin \gamma] \cos \Theta_1 + \\ &+ k \Delta x_{\Theta_1\gamma} (1 - h_a) \sin \Theta_1 \\ \Delta V_x &= k \Delta x_{\Theta_1\gamma} (1 - h_a) \cos \Theta_1 - \\ &- [k \Delta y_{\Theta_1\gamma} (1 - h_a) \cos \gamma + k \Delta z_{\Theta_1\gamma} \sin \gamma] \sin \Theta_1 \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

У систему рівнянь (33) підставимо замість  $z_{\Theta_1\gamma}, y_{\Theta_1\gamma}, x_{\Theta_1\gamma}$  відповідні значення із системи

Таблиця 2 – Результати розрахунків для найпоширеніших компоновок з різними значеннями zenітних кутів та кутів нахилу пласта

№	$D_\delta$ , мм	$d_3$ , мм	$d_6$ , мм	$G_\delta$ , кН	$\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	$\alpha_\kappa$ , град	$\gamma_n$ , град	$m$	$x_2$	$\rho$	$x_a$	$h$	$h_a$	$\varphi$ , град	$\alpha_\kappa$	$\Theta_\kappa$
1	393,7	229	90	180	1360	5	10	23,225	3,509	0,041	0,645	-0,117	0,033	4,8	4,97	35,99
2	393,7	229	90	240	1360	3,65	4	23,212	4,633	0,056	0,796	-0,092	0,17	3,6	3,64	38,95
3	295,3	229	90	220	1360	2,9	50	23,206	4,281	0,028	0,901	-0,327	0,063	2,7	2,86	36,63
4	295,3	229	90	200	1620	2,45	5,5	23,521	3,999	0,033	0,932	-0,337	0,042	2,2	2,33	36,77
5	295,3	254	100	250	1100	3,5	12	24,55	3,59834	0,01375	0,7671	-0,324	0,03634	3,2	3,53	77,62
6	295,3	240	140	160	1100	5,25	15	24,87	3,27205	0,01104	0,92995	-0,43014	0,07716	5,0	5,73	75,58
7	295,3	240	140	200	1200	10,25	20	24,96	4,12028	0,00613	1,03	-0,4927	0,11508	9,0	10,13	75,57
8	295,3	240	140	200	1100	6	25	24,87	4,09128	0,01058	1,05357	-0,48956	0,03942	5,3	5,96	77,01
9	295,3	240	140	190	1100	4	20	24,45	3,87881	0,01591	1,05453	-0,4745	0,63135	3,5	3,99	77,08
10	295,3	240	140	190	1100	10,5	30	24,47	3,91636	0,000598	1,05453	-0,50725	0,07145	9,1	10,25	76,36
11	215,9	178	100	180	1560	2,14	3,5	20,702	8,28	0,024	0,934	-0,259	0,047	2,1	2,21	36,19
12	215,9	178	100	190	1560	1,0	2,5	20,698	8,742	0,035	0,934	-0,152	0,026	1,0	1,13	35,93
13	190,5	146	100	200	1280	1,0	10	18,545	18,83	0,069	0,934	-0,894	10,005393	0,9	1,03	36,02
14	190,5	146	75	60	1100	10,5	30	17,58	4,25416	0,01073	1,05453	-0,48789	0,06373	9,3	10,55	76,54

Примітка: для 1-4 і 11-13:  $\Theta = 35^\circ$ ,  $\Theta_1 = 50^\circ$ , для 5-10 і 14:  $\Theta = 80^\circ$ ,  $\Theta_1 = 60^\circ$

рівнянь (32). Виконавши відповідні тригонометричні спрощення, отримуємо у напрямі основної координатної системи  $x$ ,  $y$ ,  $z$  прирости миттєвих переміщень  $\Delta V_x$ ,  $\Delta V_y$ ,  $\Delta V_z$ .

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_x &= kG_b \cos \alpha \left( 1 - \frac{h}{x_2} \operatorname{tg}^2 \alpha \right) \left( a \operatorname{tg} \varphi \sin \Theta + b \sin \gamma \sin \Theta_1 \right) \\ \Delta V_y &= kG_b \cos \alpha \left( 1 - \frac{h}{x_2} \operatorname{tg}^2 \alpha \right) \left( a \operatorname{tg} \varphi \cos \Theta + b \sin \gamma \cos \Theta_1 \right) \\ \Delta V_z &= kG_b \cos \alpha \left( 1 - \frac{h}{x_2} \operatorname{tg}^2 \alpha \right) (a + b \cos \gamma) \end{aligned} \right\} (34)$$

$$\text{де } G_\delta \cos \alpha \left( 1 - \frac{h}{x_2} \operatorname{tg}^2 \alpha \right) = R \cos \varphi, \quad (35)$$

$$a = 1 - h_a, \quad (36)$$

$$b = h_a \cos \gamma [\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \cos(\Theta - \Theta_1) + 1], \quad (37)$$

Кут між вертикаллю і вектором навантаження на вибій « $\varphi$ » можна визначити, розв'язавши рівняння (8) для умови стабілізації zenітного кута ( $\Psi = \alpha$ ).

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \gamma) + (1 - h_a) \operatorname{tg} \gamma}{1 - h_a - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \gamma)}, \quad (38)$$

За приростами миттєвих переміщень можна визначити zenітний  $\alpha_\kappa$  та азимутальний  $\Theta_\kappa$  кути при бурінні анізотропних гірських порід незгідно залеглих пластів за такими залежностями:

$$\operatorname{tg} \alpha_\kappa = \frac{\sqrt{a^2 \operatorname{tg}^2 \varphi + b^2 \sin^2 \gamma + 2ab \operatorname{tg} \varphi \sin \gamma \cos(\Theta - \Theta_1)}}{a + b \cos \gamma}, \quad (39)$$

$$\operatorname{tg} \Theta_\kappa = \frac{a \operatorname{tg} \varphi \sin \Theta + b \sin \gamma \sin \Theta_1}{a \operatorname{tg} \varphi \cos \Theta + b \sin \gamma \cos \Theta_1}. \quad (40)$$

Якщо  $\Theta = \Theta_1$  настає стабілізація zenітного кута. Тоді

$$\operatorname{tg} \alpha_\kappa = \frac{a \operatorname{tg} \varphi + b \sin \gamma}{a + b \cos \gamma}. \quad (41)$$

У таблиці 2 зведені результати розрахунків для найпоширеніших компоновок з різними значеннями zenітних кутів та кутів нахилу пласта.

Таким чином, при розбурюванні горизонтально залягаючих пластів ( $\gamma = 0$ ), а також ізотропних порід ( $h_a = 0$ ) zenітний кут свердловини на виході із пласта дорівнює куту між вертикаллю і вектором навантаження ( $\alpha_\kappa = \varphi$ ), а азимутальний – азимуту свердловини ( $\Theta_\kappa = \Theta$ ). Якщо  $h_a = 1$ , то zenітний кут на виході з пласта дорівнює куту нахилу пласта ( $\alpha_\kappa = \gamma$ ), а азимутальний – азимуту пласта ( $\Theta_\kappa = \Theta_1$ ). В усіх інших випадках zenітний кут на виході з пласта  $\alpha_\kappa$  знаходиться між кутами  $\varphi$  та  $\gamma$ , а азимутальний  $\Theta_\kappa$  – між кутами  $\Theta$  і  $\Theta_1$ .

На основі проведених аналітичних розрахунків бурового індексу анізотропії за допомогою ЕОМ побудовано номограми, за допомогою яких графоаналітичним методом можна визначити осьове навантаження на долото при різних КНБК і параметрах залягання пластів гірських порід для отримання проектних зенітних кутів свердловини або створення умов для їх стабілізації. Такі ж номограми можна використовувати для визначення місця встановлення опорно-центруючих елементів з метою забезпечення стабілізації роботи КНБК та просторового орієнтування осі свердловини із врахуванням режимно-технологічних параметрів та кутів залягання пластів гірських порід.

Таким чином, при бурінні свердловин в похило залеглих пластах при проектуванні осьового навантаження на долото і КНБК необхідно враховувати буровий індекс анізотропії з метою запобігання довільному викривленню свердловин.

Промислову перевірку розробленої методики визначення бурового індексу анізотропії провели в процесі буріння деяких інтервалів на свердловинах Струтинської площі Прикарпаття. За результатами буріння свердловини з врахуванням бурового індексу анізотропії для вибраних інтервалів зменшилась інтенсивність викривлення ствола свердловини. Значення зенітних кутів в інтервалах, пробурених з використанням розроблених рекомендацій, були близькі до очікуваних і знаходились у межах від 1 до 6° при 12-13° у свердловинах, які бурились без врахування вказаних рекомендацій.

Для підвищення якості робіт з керування траєкторією свердловин розроблено методику визначення бурового індексу анізотропії, яка прийнята до впровадження.

### Висновки

1. В результаті проведених досліджень одержано аналітичну залежність для визначення бурового індексу анізотропії у похилих пластах гірської породи, яка враховує кут залягання пласта. Причому на величину індексу анізотропії найбільший вплив має мінералогічний склад породи.

2. Значення бурового індексу анізотропії, визначені експериментальним шляхом, збігаються із результатами аналітичних розрахунків з достатньо високою точністю.

3. Використання бурового індексу анізотропії гірської породи дозволило раціонально вибирати режимно-технологічні параметри буріння свердловин у різних прошарках породи.

### Література

1. Вудс Г., Лубинский А. Искривление скважин при бурении. Москва: Гостоптехиздат, 1960. 161 с.
2. Александров М. М., Григулецкий В. Г., Лукьянов, В. Г. О факторах, влияющих на искривление скважин. *Труды УфНИИ*, 1980. №7.
3. Гулизаде М. П., Зельманович Г. М., Кауфман Л. Я., Сушон Л. Я. Влияние анизотропии пород по буримости на процесс пространственного искривления. *Изв.вузов. Нефть и газ*. 1975. №8. С.13-16.
4. Воевидко И. В., Кочкодан Я. М., Васько, А. И. Разработка методики определения бурового индекса анизотропии и оценка его влияния на пространственное ориентирование скважин. *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2019. № 1. С.5-13.
5. Калинин А. Г., Григулецкий В.В. Естественное и искусственное искривление скважин. Москва: Институт компьютерных исследований, 2006. 640 с.
6. Кривошеев В. В. Искривление скважин в анизотропных породах. Томск. Изд-во НТЛ, 1999. 240 с.
7. Крижанівський Є. І., Воевідко І.В. Вплив анізотропії гірських порід на зенітне викривлення свердловин з врахуванням їх орієнтації відносно геологічної структури. *Нафтова і газова промисловість*. 2003. № 6. С.20-22.
8. Сулакшин С. С. Направленное бурение. Москва: Недра. 1987.
9. Кочкодан Я. М., Васько А.І. Вплив анізотропії гірських порід на просторове орієнтування свердловин. *Матеріали XII Міжнародної наукової інтернет конференції*. 2016. №3. С.12-28.
10. Кочкодан Я. М., Васько А.І., Добруцький, Р.Л. Вплив бурового індексу анізотропії на викривлення осі свердловини від проектного профілю. *Матеріали XIII Міжнародної наукової інтернет конференції*. 2017. №5. С.72-90.
11. Спивак А. И. *Механика горных пород*. Москва: Недра. 1967.

### References

1. Vuds G., Lubinskiy A. Iskrivlenie skvazhin pri burenii. Moskva: Gostoptehizdat, 1960. 161 p. [in Russian]
2. Aleksandrov M. M., Griguletskiy V. G., Lukyanov, V. G. O faktorah, vliyayuschih na iskrivlenie skvazhin. *Trudy UfNI*, 1980. No7. [in Russian]



3. Gulizade M. P., Zelmanovich G. M., Kaufman L. Ya., Sushon L. Ya. Vliyanie anizotropii porod po burimosti na protsess prostranstvennogo iskrivleniya. *Izv.vuzov. Neft i gaz*. 1975. No 8. P.13-16. [in Russian]
4. Voevidko I. V., Kochkodan Ya. M., Vasko, A. I. Razrabotka metodiki opredeleniya burovogo indeksa anizotropii i otsenka ego vliyaniya na prostranstvennoe orientirovanie skvazhin. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*. 2019. No 1. P.5-13. [in Russian]
5. Kalinin A. G., Griguletskiy V.V. Estestvennoe i iskusstvennoe iskrivlenie skvazhin. Moskva: Institut kompyuternykh issledovaniy, 2006. 640 p. [in Russian]
6. Krivosheev V. V. Iskrivlenie skvazhin v anizotropnykh porodakh. Tomsk. Izd-vo NTL, 1999. 240 p. [in Russian]
7. Kryzhanivskiy Ye. I., Voievidko I.V. Vplyv anizotropii hirskykh porid na zenitne vykryvleniia sverdlovyn z vrakhuvanniam yikh oriientatsii vidnosno heolohichnoi struktury. *Naftova i hazova promyslovist*. 2003. No 6. P. 20-22.[in Ukrainian]
8. Sulakshyn, S. S. Napravlennoe burenye. Moskva: Nedra. 1987. [in Russian]
9. Kochkodan Ya. M., Vasko A.I. Vplyv anizotropii hirskykh porid na prostorove oriientuvannya sverdlovyn. Materialy XII Mizhnarodnoi naukovoï internet konferentsii. 2016. No3. P.12-28. [in Ukrainian]
10. Kochkodan Ya. M., Vasko A.I., Dobrutskiy, R.L. Vplyv burovoho indeksu anizotropii na vykryvleniia osi sverdlovyny vid proektnoho profilu. Materialy XIII Mizhnarodnoi naukovoï internet konferentsii. 2017. No 5. P.72-90. [in Ukrainian]
11. Spivak, A. Y. Mekhanyka hornuh porod. Moskva: Nedra, 1967. [in Russian]